

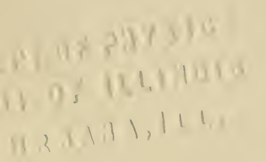
NATURWISSENSCHAFTLICHE VORTRÄGE UND SCHRIFTEN
HERAUSGEGEBEN VON DER BERLINER URANIA
HEFT 6

PHYSIKALISCHES ÜBER RAUM UND ZEIT

VON
EMIL COHN
IN STRASSBURG I. E.

ZWEITE, VERBESSERTE AUFLAGE

DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN 1913



PHYSIKALISCHES ÜBER RAUM UND ZEIT

VON

EMIL COHN
IN STRASSBURG I. E.

ZWEITE AUFLAGE

LEIPZIG UND BERLIN
DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER
1913

NACH EINEM IM NATURWISSENSCHAFTLICH-MEDIZINISCHEN VEREIN ZU STRASSBURG AM 11. FEBRUAR 1910 GEHALTENEN VORTRAG

ERNST MACH

DEM FORSCHER UND DEM LEHRER

IN VEREHRUNG UND DANKBARKEIT



Wissenschaftlich Physik treiben, heißt: in den Naturvorgängen quantitative Beziehungen auffinden und diese auf den einfachsten Ausdruck bringen. Das eine ist das Werk des Experimentators, das andere das Werk des Theoretikers. Alle Vorgänge verlaufen im Raum und in der Zeit. Wie sie in Raum und Zeit verlaufen, wie die Größen, durch die wir sie beschreiben, nach Ort und Zeit ihre Werte ändern, das haben wir zu untersuchen. Ort und Zeit sind die „unabhängigen Veränderlichen", alle anderen suchen wir darzustellen als Funktionen von diesen. Wenn also Physik als Wissenschaft möglich sein soll, so ist die erste Bedingung, daß wir Raum und Zeit selbst quantitativ erfassen können. Daß dies ausführbar sei, — daß man jeder Strecke einen bestimmten Wert in Metern, jedem Zeitintervall einen bestimmten Wert in Sekunden eindeutig zuschreiben könne, — erscheint selbstverständlich. Wir haben lernen müssen, daß dem nicht so ist, und mit dieser Erkenntnis hat unser Raum- und Zeitbegriff sich gewandelt. Diese Wandlung möchte ich darlegen.

1. Das Relativitätsprinzip der Mechanik. (Galilei-Newton.)

Eine Kugel rollt auf dem Schiffsdeck. Welches ist ihre Geschwindigkeit? Die gegen das Schiff? Das Schiff bewegt sich ja selbst! Also die gegen die Erde? Aber auch die Erde bewegt sich! Also die gegen die Sonne? — gegen die Fixsterne? — gegen ein x, gegen das die Fixsterne selbst sich bewegen und von dem wir keine Kunde haben? Diese Geschwindigkeit hat keinen Sinn, jede der übrigen hat einen bestimmten Sinn. „Die Geschwindigkeit der Kugel" ist etwas Bestimmtes, sobald wir festgelegt haben, auf welches System wir sie beziehen wollen. Ist nun ein „Bezugssystem" und damit eine bestimmte Geschwindigkeit ausgezeichnet? Das ist eine Frage an die Erfahrung. Die Erfahrung antwortet: nicht ein System, sondern eine ganze Gruppe von Systemen.

Einen kreisförmigen Messingbügel setzen wir in Rotation um seinen Durchmesser: er plattet sich ab. Ein System von zwei Holzscheiben, die durch eine vertikale Spiralfeder verbunden sind, lassen wir fallen: die Feder zieht sich zusammen. Wir wiederholen den letzten Versuch, sorgen aber durch Reibung und ein passendes Gegengewicht dafür, daß sich das System mit merklich gleichförmiger Geschwindigkeit abwärts bewegt. Jetzt bleibt die Feder gespannt, wie in der Ruhe. Den beiden ersten Fällen ist gemeinsam, daß die Geschwindigkeit veränderlich war, das eine Mal der Richtung nach, das andere Mal der Größe nach; die Bewegung war „beschleunigt". Bei dem letzten Versuch hingegen war die Geschwindigkeit konstant, sowohl der Richtung, wie der Größe nach; die Bewegung war „gleichförmig". Das Ergebnis der drei Versuche können wir offenbar so aussprechen: der elastische Körper hat die gleiche Form, ob er nun ruht gegenüber der Erde,

oder ob er ruht gegenüber einem Bezugssystem, das selbst eine gleichförmige Bewegung gegen die Erde besitzt; er hat aber eine andere Form, wenn er ruht gegenüber einem Bezugssystem, das selbst sich in beschleunigter Bewegung gegen die Erde befindet. In anderer Fassung: ein Beobachter, der mit dem Versuchskörper zusammen in eine Hülle eingeschlossen ist, wird von der gleichförmigen Bewegung nichts wahrnehmen, wohl aber von der beschleunigten. Das gleiche gilt von den Wahrnehmungen, die er an sich selbst macht: er spürt die Bewegung im Karussell, er spürt das Anfahren und das Anhalten des Fahrstuhls, aber er bemerkt nichts von von der gleichförmigen Bewegung des Fahrstuhls. Es gilt ganz allgemein: denken Sie einen Beobachter, der in seiner irgendwie begrenzten Welt beliebig viele mechanische Erfahrungen sammelt. Er soll einschlafen, seine „Welt", die bisher ruhte gegen eine gewisse weitere Umgebung, soll in Bewegung gesetzt werden, und er soll aufwachen, nachdem die Bewegung gleichförmig geworden ist: Seine neuen Erfahrungen werden den alten gleichen, er wird von dem, was ihm im Schlaf geschehen ist, nie etwas wissen können. Ist er aber in beschleunigte Bewegung, etwa in Rotation, versetzt worden, so merkt er, daß eine Veränderung vorgegangen ist. Geben wir ihm den Blick frei auf die Außenwelt, so wird er seine Erfahrungen dahin zusammenfassen, daß die Physik seiner eigenen Welt die gleiche ist für alle Bewegungszustände, die sich nur durch eine konstante geradlinige, im übrigen willkürliche Geschwindigkeit gegen die Außenwelt voneinander unterscheiden, daß sie aber verschieden ausfällt bei verschieden beschleunigten Bewegungen, insbesondere bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten gegen die Außenwelt. Auch hier wird er nicht entscheiden können, ob seine Welt sich dreht gegen die ruhende Außenwelt, oder ob die Außenwelt in entgegengesetztem Sinne um die seine kreist. Diese Frage hat keine Antwort, weil sie keinen Sinn hat. Aber seine Beobachtungen werden sich verschieden aussprechen, je nachdem er die eine oder die andere Welt als das Ruhende betrachtet, und es kann sehr wohl sein, daß eine bestimmte Vorstellung ausgezeichnet ist durch die Einfachheit, welche sie dem zusammenfassenden Ausdruck der Erfahrungen, den physikalischen „Gesetzen" verleiht. In diesem Sinne können wir „absolute" Drehbewegung definieren. Diesen Sinn hat es, wenn wir den Fixsternhimmel als ruhend und die Erde als gleichförmig um ihre Achse rotierend betrachten: nur dieser Ansatz gibt uns eine praktisch durchführbare Mechanik. Absolute gleichförmige Translationsbewegung aber können wir in keiner Weise definieren. Zwei sich gleichförmig gegeneinander bewegende Bezugssysteme sind mechanisch vollkommen äquivalent: es sind Aussagen von vollkommen gleichem Inhalt, wenn wir einmal A als ruhend, B als bewegt ansprechen, ein andermal B als ruhend, A als bewegt. Im besonderen also: mechanisch ausgezeichnet ist nicht das Fixsternsystem für sich allein, sondern mit ihm die ganze Gruppe aller der Systeme, welche gegen die Fixsterne eine gleichförmige Bewegung besitzen, die ganze Fixsterngruppe, wie wir sie nennen wollen. Hiermit ist das „Relativitätsprinzip" der Mechanik ausgesprochen, das auf Galilei und Newton zurückgeht.

2. Das Relativitätsprinzip der Elektrodynamik. (Lorentz-Einstein.)

Man hat stets versucht, die in der Mechanik gewonnenen Erfahrungen zu übertragen auf die übrigen Gebiete der Physik, mechaniche Prinzipien zu allgemeinen physikalischen Prinzipien zu erweitern. Man ist hierin so weit gegangen, als letztes Ziel der physikalischen Forschung hinzustellen: Zurückführung aller beobachteten Vorgänge auf die Bewegung von Teilchen, die bestimmten Kräften unterworfen sind. Diese Forderung ist in letzter Instanz offenbar die Forderung an die Natur: daß sie mechanisch begreifbar sein müsse. Das können wir nicht erzwingen; wir können lediglich Fragen, keine Befehle an die Natur richten. Aber als ein Leitfaden zur Stellung zweckmäßiger Fragen, als „Arbeitshypothese" ist der Gedanke wohl berechtigt; seine Legitimation findet er in der Geschichte der Physik; es sind Bewegungsvorgänge, an denen zuerst umfassende Gesetzmäßigkeiten erkannt wurden.

Da ist es nun auffällig, daß sich das Relativitätsprinzip der Mechanik bei der Strahlung nicht bewährt, – bei der Strahlung und somit in der Elektrodynamik; denn daß die Ausbreitung der Strahlung ein elektrischer Vorgang ist, dürfen wir seit Heinrich Hertz als sicher begründete Erfahrung ansehen. Der entscheidende Versuch, den Fizeau zuerst angestellt hat, ist dieser: In einer mit gleichförmiger Geschwindigkeit strömenden Flüssigkeit möge sich Licht fortpflanzen in der Richtung der Strömung. Nach dem Relativitätsprinzip müßte ein im Strom treibender Beobachter die gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit wahrnehmen, wie wenn die Flüssigkeit ruhte. Der außen stehende Beobachter müßte also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts um die volle Geschwindigkeit der Flüssigkeit vermehrt finden. (Man denke an die Kugel, die auf dem Schiffsdeck rollt.) Das aber ist nicht der Fall: es kommt nur ein bestimmter Bruchteil der Strömungsgeschwindigkeit hinzu. Dieser Bruchteil hängt vom Brechungsexponenten der Flüssigkeit ab. Den Extremfall, mit dem wir uns im folgenden allein eingehender beschäftigen wollen, haben wir, wenn es sich um ein Gas handelt, das sich vom leeren Raum optisch kaum unterscheidet: da kommt gar nichts hinzu: der außen stehende Beobachter stellt fest, daß sich für ihn das Licht genau so fortpflanzt, wie wenn das Gas ruhte. Oder genauer, im engeren Anschluß an das Experiment: es pflanzt sich für ihn genau so schnell fort in der Richtung der Gasströmung, wie in der entgegengesetzten. Er muß also schließen, daß für einen gedachten Beobachter, der die Bewegung des Gases teilt, die Geschwindigkeit des Lichts sich um den vollen Betrag seiner eigenen Geschwindigkeit vermindert, wenn beide gleich gerichtet sind, und um den gleichen Betrag vermehrt, wenn sie einander entgegen gerichtet sind. (Fig. 1.)

In dem Fall dieses hier nur gedachten mitbewegten Beobachters im bewegten Luftmeer sind wir nun aber andauernd. Die Erde bewegt sich im Jahreslauf um die Sonne mit einer Geschwindigkeit, die wir in jedem Moment als gleichförmig betrachten dürfen, und die ziemlich genau ein Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Also müssen wir an optischen (allgemein an elektrischen) Vorgängen, die sich an der Erdoberfläche ab-

spielen, die Bewegung der Erde erkennen können. Denken Sie (Fig. 2) einen Lichtstrahl, der in der Richtung der Erdbewegung von A nach B läuft: er durchläuft im Weltraum einen längeren Weg und braucht entsprechend mehr Zeit. Er werde in B gespiegelt und kehre nach A zurück. Jetzt ist der Weg kürzer als BA; aber der Gesamtweg ist, wie eine einfache Rechnung zeigt, durch die Erdbewegung verlängert. Ein zweiter Strahl laufe (Fig. 3), senkrecht zur Erdbewegung, von A nach C und werde ebenfalls nach A reflektiert. Auch sein Weg ist verlängert, aber, wie aus der Rechnung folgt, weniger als der Strahl ABA. Im ganzen also: wenn die Strahlen nach B und C gleichzeitig von A ausgehen, und wenn AB und AC genau gleich lang sind, so kommt doch der erste Strahl später nach A zurück als der zweite. Jetzt werde der ganze Apparat um 90 Grad gedreht, so daß nun der Arm AC in der Richtung der Erdbewegung liegt, AB senkrecht dazu. Nun ist der Strahl AC in der Ankunft verspätet. Die Drehung muß also eine Veränderung der beobachteten Erscheinung (des Interferenzbildes) hervorrufen.[1]) Der Versuch ist zum erstenmal ausgeführt worden von Michelson. In den neuesten Versuchen waren die Längen so bemessen, daß die Drehung ebenso wirken mußte wie eine Verlängerung des einen Lichtwegs um rund ein tausendstel Millimeter. Gemessen werden konnten mit aller Sicherheit Verlängerungen um ein Hundertstel dieses Betrages; aber auch dieses Hundertstel war nicht vorhanden. — Nach diesem sind noch eine Reihe anderer optischer und elektrischer Versuche angestellt worden, die an irdischen Vorgängen einen Einfluß der Translationsbewegung der Erde nachweisen sollten. Ausnahmslos war das Ergebnis negativ, obgleich der zu erwartende Effekt der Beobachtung nicht hätte entgehen können. Alle diese Versuche verliefen also so, als ob das Relativitätsprinzip der Mechanik auch in der Elektrodynamik gälte, — während es nach dem Fizeauschen Versuch nicht gilt. Hier liegt ein Widerspruch vor, der unlösbar scheint.

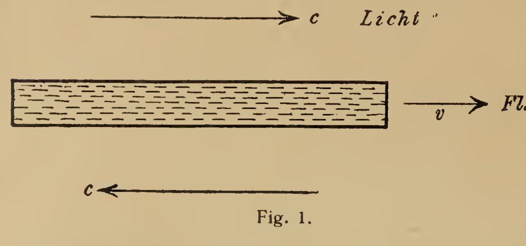


Fig. 1.

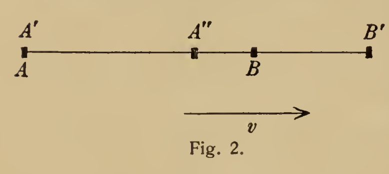


Fig. 2.

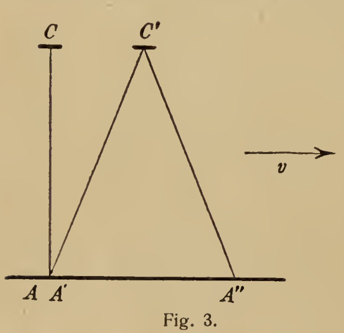


Fig. 3.

Die Lösung, welche gegenwärtig die herrschende Arbeitshypothese der Physiker bildet, lautet: Das Relativitätsprinzip gilt tatsächlich auch optisch-elektrisch. Der mitbewegte Beobachter kann in keiner Weise seine gleichförmige Bewegung feststellen. Auch optisch-elektrisch also existiert kein ausgezeichnetes Bezugssystem, mittels dessen „absolute Bewegung" und

1) Siehe Fig. 4. Bei A befindet sich eine Glasplatte, die den ankommenden Strahl nach B und C teilt und die reflektierten Strahlen wieder vereinigt.

„absolute Ruhe" definierbar wäre. Wenn der nichtmitbewegte Beobachter einen Einfluß der Bewegung für den mitbewegten Beobachter festzustellen vermeint, den dieser selbst nicht wahrnimmt, so liegt das daran, daß beide Beobachter mit verschiedenem Maß messen, daß es verschiedene Dinge sind, die sie als identische Zeiten, gleiche Zeitintervalle und gleiche Längen ansprechen. Dieses Relativitätsprinzip der Elektrodynamik, das als „Lorentz-Einsteinsches" bezeichnet wird, wollen wir jetzt entwickeln.

Aus der unendlichen Fülle der Erscheinungen heben wir zunächst die eine heraus, der unsere letzten Betrachtungen galten: die Ausbreitung des Lichts im leeren Raum. Sie soll — so verlangt das Prinzip — für den einen wie für den andern Beobachter gleichförmig nach allen Richtungen erfolgen, und für beide Beobachter mit derselben Geschwindigkeit. Da erhebt sich zunächst die Frage: wie messen wir denn eine Geschwindigkeit? wie messen wir die Zeitdauer eines Vorganges, der sich über ein auch räumlich ausgedehntes Gebiet erstreckt? Ein Schütze möge etwa die Zeit zu bestimmen haben zwischen dem Abfeuern und dem Einschlagen des Geschosses. Beurteilt er das Einschlagen nach dem Gehör, so muß er die Zeit berücksichtigen, die der Schall braucht; andernfalls würde er einen vollständig falschen Wert für die Flugdauer seines Geschosses erhalten. Das Ideal wäre ein zeitloses, unendlich schnell sich fortpflanzendes Signal. Aber das existiert nicht. Die schnellsten Signale, die wir kennen, sind Lichtsignale im leeren Raum, — praktisch gleich auch in der Luft. Und so haben wir denn auch kein genaueres Verfahren, Zeitwerte von Ort zu Ort mitzuteilen, als Lichtsignale. In der Regel dürfen wir bei physikalischen Messungen die Ausbreitung des Lichts als zeitlos behandeln, — durchläuft es doch 300000 Kilometer in der Sekunde. Aber das ist offenbar nicht mehr zulässig, wenn die zu beobachtende Erscheinung mit ähnlicher Geschwindigkeit fortschreitet, also vorerst nicht bei der Untersuchung der Lichtausbreitung selbst. Hier, scheint es, geraten wir in einen bedenklichen Zirkel: wir müssen die Übertragungszeit eines Lichtsignals kennen, um die Lichtgeschwindigkeit messen zu können. Ganz so schlimm steht es nicht. Die Lichtgeschwindigkeit wird auf der Erde[1]) so bestimmt: Ein Lichtsignal wird von A nach B gesandt, in B gespiegelt und nach A zurückgesandt; die Gesamtzeit wird in A beobachtet und in die doppelte Entfernung AB dividiert. Es sind also Zeiten nur an einem Ort zu beobachten. Dafür aber muß eine Voraussetzung gemacht werden: daß

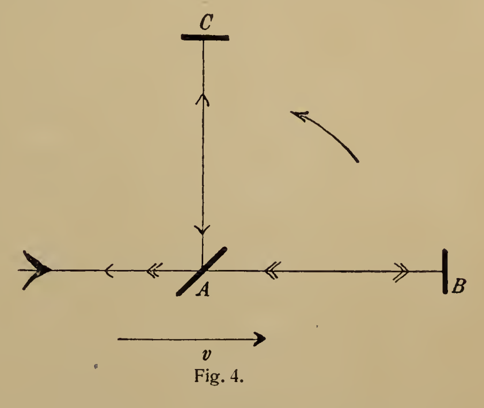


Fig. 4.

1) Nur die „terrestrischen" Methoden kommen hier in Betracht; die „astronomischen" Methoden können erst verstanden werden, wenn wir die Prinzipien, die hier entwickelt werden sollen, bereits besitzen. Das gleiche gilt von dem Verfahren, das zunächst als das prinzipiell einfachste erscheinen mag: Herstellung zweier absolut gleicher Uhren von idealer Ablesungsgenauigkeit und Überführung derselben auf die zwei Beobachtungsstationen.

das Licht sich mit der gleichen Geschwindigkeit von A nach B und von B nach A fortpflanzt. Diese Voraussetzung machen wir nun tatsächlich stets, ohne sie im allgemeinen der Erwähnung wert zu halten: wir nehmen an, das Licht pflanze sich nach allen Richtungen gleichmäßig fort. Sobald wir das tun, haben wir aber auch sofort eine Methode von größter Genauigkeit, um Zeiten an verschiedenen Orten aufeinander zu beziehen: Der Synchronismus einer Straßburger und einer Kehler Uhr, die vorher auf gleichen Gang geprüft seien, kann und soll so hergestellt werden. Straßburg sendet zur Zeit 0 ein Lichtsignal nach Kehl, das dort gespiegelt wird; es sei zur Zeit 2 nach Straßburg zurückgekehrt. Die Uhr in Kehl geht dann richtig, wenn sie im Moment der Signalankunft die Zeit 1 zeigte, und ist andernfalls um die Differenz zu korrigieren. Wenn wir so, wie hier mit der Kehler Uhr, mit allen möglichen Uhren auf der Erde verfahren, so ist nun die Lichtausbreitung gleichförmig für den Bewohner der Erde.[1]) Denken wir uns nun aber ein Wesen mit menschlichem Intellekt auf der Sonne, — oder, allgemeiner gesprochen, ein Wesen, welches die Bewegung der Erde nicht mitmacht, sondern seine Lage gegen die Sonne unverändert beibehält. Diesem „Sonnenmenschen" kann nichts näher liegen, als die Lichtausbreitung als gleichförmig anzusehen für sich, d. h. gegen die Sonne. Er findet sie gleichförmig, sobald er sich nach demselben Prinzip wie der Erdenmensch, aber gemäß seinen eigenen Beobachtungen einen Satz „synchron laufender" Uhren hergestellt hat. Aber er findet, wenn er sich neben eine seiner Uhren stellt und nacheinander die vorübereilenden irdischen Uhren betrachtet, daß diese verschiedene Differenz gegen seine Uhr zeigen, und daß sie folglich nicht synchron sind. Und das gleiche nimmt der Erdenmensch an den Uhren des Sonnenmenschen wahr. Genauer: die Erde bewege sich in der Richtung $A'B'$ (Fig. 2); ein Lichtstrahl gehe von dem Punkt A der Erde aus, wenn A mit A' zusammenfällt; er erreiche den Punkt B der Erde, wenn B mit B' zusammenfällt; er werde hier nach A reflektiert und erreiche diesen seinen Ausgangspunkt, wenn er mit A'' zusammenfällt. Dann ist der Weg bis zum Spiegel die Hälfte des ganzen Weges für den Erdenmenschen, aber mehr als die Hälfte für den Sonnenmenschen. Gesetzt also, die Sonnenuhr in A' und die irdische in A stimmten überein; dann muß die Sonnenuhr in B' vorgehen gegen die irdische Uhr in B, wenn beide aneinander vorbeigleiten. Lassen wir aber den Lichtstrahl senkrecht zur Bewegungsrichtung nach C gehen (Fig 3) und ebenfalls reflektiert werden, dann beschreibt er gegen die Erde den Weg ACA, gegen die Sonne den Weg $A'C'A''$. Der eine Weg wird in C, der andere in C' halbiert. Die Uhren in C und in C' stimmen also überein, wenn die Uhren in A und in A' es tun.

Das zieht eine weitere Differenz als Folge nach sich: Wir bewegen uns mit einem Meterstab, den wir in der Richtung der Bewegung halten. Mittels dieses Stabes sollen wir auf einem gegen die Sonne ruhenden Stab ein Meter abgrenzen. Dazu müssen wir von den Enden unseres Stabes aus gleichzeitig Marken einschneiden. Machen wir etwa die Marke am

1) Nach Konstruktion für das Zentrum Straßburg und tatsächlich für jedes Zentrum.

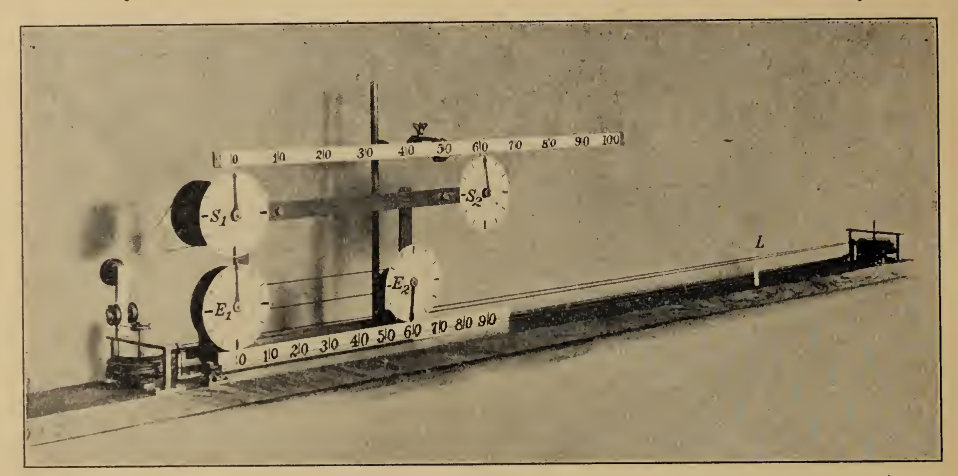
vorderen Ende später als am hinteren Ende, so grenzen wir mehr als ein Meter ab. Wir begehen nun diesen Fehler tatsächlich nach dem Urteil des Sonnenmenschen, wenn wir nach unserem Urteil über gleiche Zeiten richtig verfahren. Diese Diskrepanz besteht nicht, wenn der Stab senkrecht zur Bewegungsrichtung gehalten wird. Nehmen wir gleichzeitig zwei gekreuzte Meterstäbe: die Figur im Sonnensystem, die wir für kongruent mit diesem gleicharmigen Kreuz erklären, findet der Sonnenmensch nicht als gleicharmig; der Arm in der Bewegungsrichtung ist länger. Oder umgekehrt: was, mit der Sonne verbunden und von der Sonne aus vermessen, sich als Kugel ergibt, das ist für unsere Beobachtung ein in der Richtung der Erdbewegung abgeplatteter Körper.

Wir sind noch nicht am Ende. Betrachten wir nochmals die Fig. 3. Derselbe Vorgang stellt sich für den Erdenmenschen als Lichtausbreitung über den Weg ACA, für den Sonnenmenschen als Lichtausbreitung über den der Figur nach längeren Weg $A'C'A''$ dar. Es sollen aber – so haben wir gefordert – der Erdenmensch und der Sonnenmensch dieselben Erfahrungen machen; beide sollen also auch den gleichen Wert der Lichtgeschwindigkeit finden. Also müssen beide schließlich auch noch verschiedenes Zeitmaß haben; ihre Uhren müssen verschiedenen Gang besitzen.

Wir haben bisher, und zwar lediglich qualitativ, gezeigt, zu welcher Art von Konsequenzen das Relativitätsprinzip uns zwingt. Wir haben nicht gezeigt, daß sich alle Forderungen, die bezüglich der Lichtausbreitung aus dem Prinzip fließen, auch streng befriedigen lassen. Das ist der Fall, und es ist nur auf eine Weise möglich. Zunächst noch einmal das Postulat: „Für jedes der beiden Systeme ist die Lichtausbreitung im leeren Raum der gleiche Vorgang; mit gleicher Geschwindigkeit und jedesmal gleichförmig nach allen Richtungen. Keines der beiden Systeme ist vor dem andern ausgezeichnet.“ Dieses Postulat läßt sich mathematisch sehr einfach formulieren. Die Lösung bildet eine Gruppe einfacher Beziehungen zwischen den Koordinaten und Zeiten der beiden Systeme. Diese sind im Anhang gegeben. Was dort die Gleichungen aussagen, das ist hier im Modell ausgeführt. (S. Abbild. auf folg. Seite.)

Eine über zwei Rollen laufende endlose Schnur, die wir in Bewegung setzen werden, soll uns durch die Fortführung einer aufgesetzten Marke (L) die Fortpflanzung eines Lichtsignals in der einen oder anderen Richtung darstellen. Das Zimmer und die in ihm fest aufgestellten zwei Uhren S_1 und S_2 gehören dem „ruhenden“ System der Sonne an. Der auf Schienen laufende Wagen mit seinen zwei Uhren E_1 und E_2 bilde das „bewegte“ System der Erde. Alle Bewegungen: die des Lichtsignals, des Wagens, der Zeiger der zweierlei Uhren, werden von derselben Achse aus getrieben; ihre Geschwindigkeiten stehen in fest gegebenen Verhältnissen. Nur auf diese Verhältnisse kommt es an: daß wir die ungeheure Lichtgeschwindigkeit durch eine Geschwindigkeit von nur wenigen Zentimetern in der Sekunde ersetzt haben, ist unwesentlich; wesentlich aber ist, daß hier die Erdgeschwindigkeit gleich $^3/_4$ der Lichtgeschwindigkeit gemacht ist, während das Verhältnis in Wirklichkeit nur $^1/_{10000}$ beträgt. Wir wollen, lediglich der bequemen Verständigung wegen, die Umlaufszeit einer Uhr „12 Stunden“

nennen und dementsprechend von 1 Uhr, 2 Uhr sprechen. Bezüglich der Längen bleiben wir beim Sprachgebrauch. Wir konstatieren dann, daß irgendeine Marke an unserem Wagen die 60 cm lange Strecke zwischen den beiden himmlischen Uhren in $10^1/_2$ Stunden zurücklegt. Dies also ist an unserm Modell und in unserer Sprache die Geschwindigkeit der Erde gegen die Sonne. Wir sind gegenüber diesem Modell in der Welt des „Sonnenmenschen". Wir könnten daher von den zwei Uhren des Sonnensystems eine entbehren, denn was in unserer Welt identische Zeiten an verschiedenen Orten sind, erkennen wir unmittelbar vermöge der wirklichen Lichtsignale. Aber um die Erfahrungen des Sonnenmenschen und nur diese zu machen, müssen und wollen wir von dieser Fähigkeit abstrahieren; eine größere Signalgeschwindigkeit, als die der Marke auf der Schnur, existiert ja für ihn nicht. Daß also die beiden Uhren des Sonnensystems



synchron sind, das wird für uns nicht durch den gleichzeitigen Blick auf ihre beiden Zeiger, sondern vielmehr dadurch bewiesen, daß die Lichtmarke die gleiche Zeit braucht, um von der ersten zur zweiten Uhr vorzulaufen, wie zum Rückweg von der zweiten zur ersten Uhr. Das ist nun tatsächlich der Fall: die Lichtmarke verläßt die erste Uhr, wenn diese 12^h zeigt, erreicht die zweite, wenn diese $7^h\ 40^m$ zeigt, und ist, sofort zur Umkehr veranlaßt, wieder bei der ersten Uhr angelangt, wenn diese $3^h\ 20^m$ zeigt. Sie hat also den Weg von 60 cm jedesmal in der gleichen Zeit von $7^2/_3$ Stunden zurückgelegt.[1])

Was Ihnen nun beim ersten Blick auffallen wird, das ist, daß die beiden Uhren des irdischen Systems nicht gleiche Zeit zeigen: die zweite Uhr — die vordere im Sinn der Bewegung — geht um $5^3/_4$ Stunden nach gegen die erste. Das ist so für unsern Blick und würde sich auch so ergeben, wenn wir das irdische System festhielten, die Lichtmarke laufen ließen, und nun — wie soeben — die Zeit für Hin- und Rückweg bestimmten. Aber so ist der Synchronismus der beiden Uhren ja nicht verstanden. Sie sollen synchron sein für den irdischen Beobachter, der sich mit einer ganz bestimmten

1) Die Zahlen sind ein wenig abgerundet.

Geschwindigkeit — $^3/_4$ der Lichtgeschwindigkeit — gegen das Sonnensystem bewegt. Und für ihn sind sie tatsächlich synchron. Der Beweis liegt in folgendem (Fig. 5)[1]: Die Lichtmarke verläßt die erste Uhr, wenn diese 12^h zeigt; sie holt die zweite Uhr ein in dem Moment, wo diese $7^h\,40^m$ zeigt, und sie begegnet zurückkehrend der ersten, wenn diese $3^h\,20^m$ zeigt. Die Zeiten für Hin- und Rückgang sind also wiederum einander gleich, nämlich wiederum je $7^2/_3$ Stunden. Der Maßstab des irdischen Systems ergibt ferner wiederum 60 cm als Abstand der beiden Uhren, und somit ist die Geschwindigkeit des Lichts im irdischen System wieder die gleiche, wie im Sonnensystem: 60 cm in $7^2/_3$ Stunden.

Aber ist denn unser irdischer Maßstab richtig? Der unmittelbare Augenschein sagt: Nein, er ist verkürzt; die angeblichen „60 cm" decken nur 40 cm des daneben liegenden Sonnenmaßstabes. Dieses Urteil bestätigt sich,

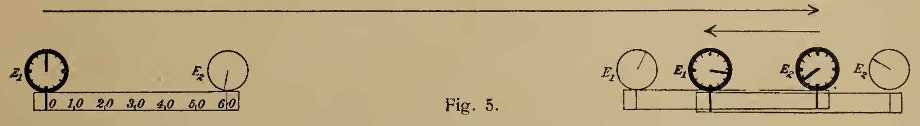


Fig. 5.

wenn wir, auf unsere „übermenschlichen" Fähigkeiten verzichtend, uns der Messungsmethode bedienen, die dem Sonnenmenschen allein zur Verfügung steht; er muß von zwei Stellen aus Marken auf dem vorübergleitenden Erdenmaßstab einschlagen, und zwar gleichzeitig, d. h. in Momenten, wo zwei dort befindliche Sonnenuhren gleiche Zeit zeigen (Figur 6). Was er so von den Stellen der zwei festen Uhren aus abträgt, das deklariert der irdische Maßstab als „90 cm", während die beiden Sonnenuhren doch laut Sonnenmaßstab nur um 60 cm voneinander abstehen. Also wie oben: der irdische Maßstab ist gegen den himmlischen verkürzt im Verhältnis 2 zu 3.

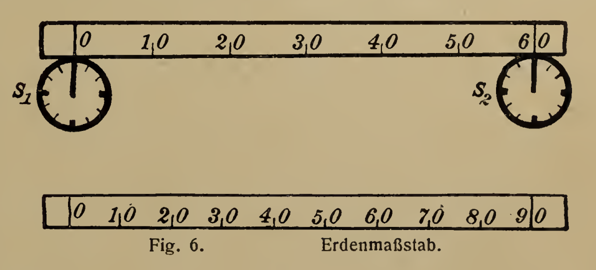


Fig. 6. Erdenmaßstab.

Es scheint also, wir haben einen wunderlichen Konstruktionsfehler begangen, um ein dann nicht mehr verwunderliches Resultat zu bekommen. So steht es nicht. Wir können mit genau dem gleichen Recht behaupten, der himmlische Maßstab sei gegen den irdischen im Verhältnis 2 zu 3 verkürzt. Wir erhalten dieses Resultat, wenn wir die Messung durch den irdischen Beobachter vornehmen lassen (Figur 7). Dieser hat von zwei Stellen aus, wo er in unserem Modell Uhren besitzt, Marken auf dem vorübergleitenden himmlischen Maßstab einzuschlagen zu Momenten, wo diese seine Uhren eine und dieselbe Zeit zeigen, sagen wir 12^h. Die erste Uhr passiert in diesem Moment gerade den Nullpunkt des Himmelsmaßstabes; wenn die zweite Uhr ebenfalls 12^h zeigt, ist sie bei Teilstrich „90 cm" an-

1) In den Figuren 5 bis 9 sind jedesmal nur die für den betreffenden Versuch wesentlichen Teile des Modells stark gezeichnet; daneben sind andere Teile schwach angedeutet, um die Orientierung zu erleichtern.

gelangt. Die beiden irdischen Uhren stehen aber laut Erdenmaßstab nur 60 cm voneinander ab. Diese Entfernung hat also der Erdenbewohner übertragen, während der himmlische Maßstab sie als 90 cm deklariert.

Also: dem Sonnenmenschen erscheinen die irdischen, dem Erdenmenschen die himmlischen Maßstäbe in der Bewegungsrichtung verkürzt im Verhältnis 2 zu 3, jedesmal gegenüber den Wertungen, welche diese Maßstäbe in ihrer eigenen Welt erfahren.

Aber weiter: haben denn unsere Uhren richtigen Gang? Ein Blick zeigt uns, daß die irdischen Uhren langsamer laufen als die himmlischen. Und so wird auch der Sonnenmensch aussagen, der mit uns in der gleichen Welt

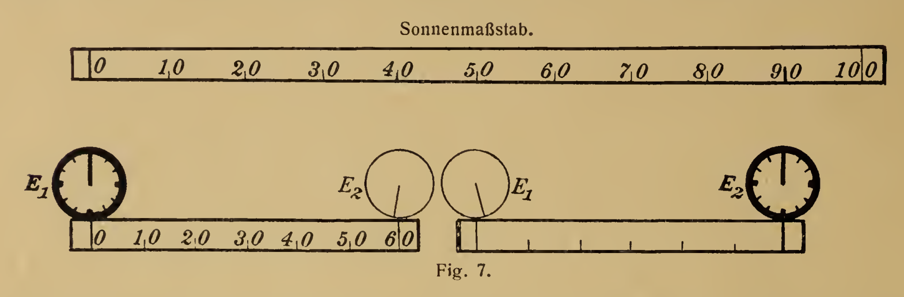


Fig. 7.

lebt, aber unsern schnellen Blick entbehren muß. Er beobachtet den Stand einer irdischen Uhr zu zwei verschiedenen Zeiten, d. h. er vergleicht ihn mit dem Stand seiner beiden Uhren, während sie an diesen vorübergeht. Er findet so (Figur 8): Der Zeiger der irdischen Uhr ist, während sie von der ersten bis zur zweiten himmlischen Uhr — durch 60 cm — sich bewegt,

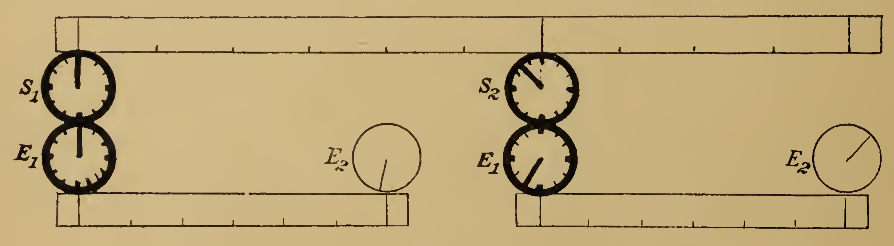


Fig. 8.

um 7 Stunden vorgerückt; die Angaben der beiden himmlischen Uhren in den Momenten der Vorübergänge aber differieren um $10\frac{1}{2}$ Stunden. Er schließt also: ein Ereignis, das sich in einem bestimmten Punkt der Erdenwelt abspielt, und dessen Dauer dort mit 7 Stunden gewertet wird, das hat „in Wirklichkeit" $10\frac{1}{2}$ Stunden gedauert.

Und wiederum: wie die irdischen Uhren zu langsam gehen nach dem Urteil des Sonnenmenschen, so gehen die Sonnenuhren zu langsam im gleichen Verhältnis 2 zu 3 nach dem Urteil des Erdenmenschen. Denn er beobachtet folgendes (Fig. 9): Eine himmlische Uhr (die zweite im Modell) gleitet an den beiden irdischen Uhren vorbei, die für ihn synchron sind; während dieser Bewegung läuft die himmlische Uhr nur um $\frac{2}{3}$ soviel fort, wie im vorigen Versuch, nämlich um 7 Stunden; die beiden irdischen Uhren aber differieren in den Momenten der Vorübergänge um $10\frac{1}{2}$ Stunden.

Also: dem Sonnenmenschen erscheinen die irdischen, dem Erdenmenschen die himmlischen Vorgänge in ihrem Ablauf verlangsamt im Verhältnis 2 zu 3.

Wir fassen zusammen. Was wir an unserm Modell gezeigt haben, ist dies: wir können die Uhren und Maßstäbe in zwei gleichförmig gegeneinander bewegten Systemen S und S' so einrichten, daß, an ihnen gemessen, eine bestimmte Geschwindigkeit den gleichen Wert zeigt für den Beobachter B in S wie für den Beobachter B' in S', mag nun diese Geschwindigkeit mit der Bewegungsrichtung von S' zusammenfallen oder ihr entgegengerichtet sein; und daß ferner B an den Meßinstrumenten in S' die gleichen Beobachtungen macht, wie B' an den Instrumenten in S. Es mögen nun ferner alle Uhren in S', die in einer zur Bewegungsrichtung senkrechten Ebene liegen, die *gleiche* Differenz gegen die entsprechenden Uhren in S erhalten, und alle Maßstäbe in einer solchen Ebene in S' *gleich* beziffert werden wie die Maßstäbe in S, mit denen sie zur Deckung kommen. Dann gilt das Gesagte allgemein: für *jede* Richtung der Geschwindigkeit und für *beliebig* gelegene Uhren und Maßstäbe. Also bei geeigneter Einrichtung von Uhren und Maßstäben gilt: Ein Vorgang, der von S aus als gleichförmige Ausbreitung irgendeines Zustandes nach allen Richtungen mit der bestimmten Geschwindigkeit c erscheint, erscheint genau ebenso von S' aus; — und keines der beiden Systeme ist dem andern gegenüber bezüglich seiner Raum- und Zeitmessung ausgezeichnet.



Fig. 9.

Das Relativitätsprinzip behauptet nun: Wenn S und S' der Fixsterngruppe angehören, und wenn als die Geschwindigkeit c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum gewählt wird, dann verlaufen *alle* elektrischen — und im besonderen also alle optischen — Vorgänge so, daß kein Unterschied zwischen den beiden Systemen merkbar wird.

Die Prüfung dieser Behauptung gestaltet sich folgendermasen: Alle unsere Erfahrungen beruhen auf Beobachtungen, die von einem *bestimmten* System der Fixsterngruppe aus gemacht sind, — von der Erde. Zu diesem System gehören *unsere* Maßstäbe, *unsere* Uhren. Mit diesen Maßstäben und Uhren legen wir zunächst fest, wie optisch-elektrische Erscheinungen an der Erdoberfläche quantitativ beschaffen sind. Unser Prinzip nun behauptet: genau dieselben Gesetze findet der Bewohner eines anderen Systems für die Erscheinungen in *seinem* System, sofern er mit *seinen* Maßstäben

und Uhren wertet, und es gibt uns zugleich an, wie wir umzuwerten haben, um zu erfahren, wie uns diese Erscheinungen entgegentreten müssen.

Ein Beispiel: wir wissen[1]), daß das Licht von einer (gegen uns) ruhenden, im Vakuum befindlichen Lichtquelle sich nach allen Richtungen gleichförmig mit der Geschwindigkeit $c = 300000$ km/sec fortpflanzt. Genau so muß also die Lichtausbreitung von einem Fixstern vor sich gehen für einen Bewohner des Fixsterns. Dann ergibt die Umwertung nach dem oben Gesagten: auch für uns erfolgt sie gleichförmig mit der Geschwindigkeit c. Aber sie ergibt weiter: die Richtung der Strahlung, die zu uns gelangt, fällt nicht in die Verbindungslinie Stern-Erde. Der Fixstern erscheint uns also nicht an seinem wahren Ort, sondern seitlich verschoben, und zwar gerade in der Richtung und in dem Betrage, wie es die sogenannte Aberration uns tatsächlich zeigt.[2])

Ein zweites Beispiel: Wir wissen, wie das Licht sich in ruhendem (für uns ruhendem) Wasser fortpflanzt: gleichmäßig nach allen Richtungen, und mit einer Geschwindigkeit q, die der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum und dem Brechungsexponenten n des Wassers ist. Wie pflanzt es sich nun in einer Wassersäule fort, die (gegen uns) die Geschwindigkeit w hat? Für denjenigen, der im Wasser treibt, genau ebenso. Möge nun etwa speziell die Fortpflanzung in der Richtung der Strömung stattfinden. Dann könnten wir die Umwertung für unsere Wahrnehmung mittels unseres Modells ausführen, indem wir der Lichtmarke die Geschwindigkeit q (statt wie bisher c) gegen das bewegte System erteilten und dann nachsähen, welche Geschwindigkeit ihr im ruhenden System zukommt. Es würde sich zeigen, daß dies nicht q ist, aber auch nicht die Summe aus q und der Strömungsgeschwindigkeit w, sondern ein gewisser mittlerer Wert, nämlich gerade der, den Fizeau experimentell gefunden hat.[3])

Wie in diesen Beispielen, so steht es allgemein: es gibt keinen optisch-elektrischen Vorgang, der mit dem Relativitätsprinzip in Widerspruch stände. Eine andere Frage aber ist, wie weit das Prinzip durch unsere Erfahrungen bewiesen ist. Da ist zu bemerken: die Umwertung enthält zwei Schritte, erstens die von Punkt zu Punkt wechselnde Verschiebung der Zeitskalen, zweitens die Veränderung der Zeitintervalle und Maßstäbe. Aber diese beiden Schritte wirken in sehr verschiedenem Maß zum Resultat mit. Das hängt so zusammen: Das Verhältnis der Körpergeschwindigkeit w zur Lichtgeschwindigkeit c ist stets ein sehr kleiner Bruch, — etwa $1/_{10\,000}$ im Fall der Aberration, und weniger als $\frac{1}{30 \text{ Millionen}}$ im Fall des strömenden Wassers. Mit diesem Bruch vergleichbar — „von dieser Größenordnung" — sind die verhältnismäßigen Abweichungen, die die Zeitverschiebung hervorruft; sie sind mit den feinsten optischen Hilfsmitteln noch meßbar. Die Intervall- und Maßstabsänderungen aber haben nur Abweichungen von der Ordnung $(w/c)^2$, also $\frac{1}{100 \text{ Millionen}}$ bzw. $\frac{1}{900 \text{ Billionen}}$ zur Folge, und diese entziehen sich jeder Wahrnehmung.

---

1) Siehe unten S. 17. 2) Die Ausrechnung siehe im Anhang.
3) Die Ausrechnung siehe im Anhang.

Das gleiche gilt von allen Beobachtungen an Körpern, die sich relativ zur Erde bewegen: bei Bewegungen, die wir nach unserm Willen hervorrufen, bleibt stets die Geschwindigkeit zu klein; bei den Bewegungen der Himmelskörper aber wird der Erfolg dadurch ausgeschlossen, daß wir hier nur beobachten, nicht experimentieren können. Alle diese Beobachtungen wären also auch verträglich mit einer Elektrodynamik, welche das Relativitätsprinzip nicht in vollem Umfang enthielte.

Die Versuche, welche zur Aufstellung des Prinzips geführt haben, beziehen sich auf die Ausbreitung des Lichts relativ zur Erde. Die Geschwindigkeit der Erde gegen die Sonne beträgt, wie schon erwähnt, $^1/_{10000}$ der Lichtgeschwindigkeit, und es ist Michelson und seinen Nachfolgern gelungen, nachzuweisen, daß Änderungen der Lichtausbreitung durch diese Bewegung nicht hervorgerufen werden, nicht im Betrage von $\frac{1}{100 \text{ Millionen}}$ ihres Wertes, ja auch nicht um einen kleinen Bruchteil dieses Bruches. Also: trotz der Bewegung der Erde ist mit aller Genauigkeit die Lichtausbreitung relativ zur Erde gleichförmig für den Bewohner der Erde. Was diese Feststellung physikalisch bedeutet, soll jetzt näher erörtert werden.

3. Das Lorentz-Einsteinsche Relativitätsprinzip als allgemeines Prinzip der Physik.

Wir haben bisher ausschließlich von optisch-elektrischen Beobachtungen gesprochen. Um diese Beobachtungen ausführen zu können, brauchen wir Maßstäbe und Uhren. Daß diese Meßinstrumente richtig sind und in jeder Lage, an jedem Ort, zu jeder Zeit richtig bleiben, haben wir vorausgesetzt. Im einzelnen: Erstens: Wir drehen einen Maßstab; er soll seine Länge behalten. Wir drehen eine Kugel; sie soll eine Kugel bleiben. Der Maßstab, die Kugel gelangen ohne unser Zutun im Lauf des Tages in verschiedene Orientierung gegen die Sonne; auch dabei sollen sie sich nicht ändern. Zweitens: Eine Uhr, die in einem bestimmten Moment sich am vorderen Rand der Erde befindet, ist nach zwölf Stunden an den hinteren Rand gelangt; sie soll nach wie vor richtige Zeit zeigen. Drittens: Durch das Zusammenwirken der Bewegung der Erde um die Sonne und der Bewegung des Sonnensystems gegen die Fixsterne entstehen wechselnde Werte für die Geschwindigkeit der Erde gegen die Fixsterne; auch durch diese Geschwindigkeitsänderungen soll die Länge unserer Maßstäbe nicht geändert werden und ebensowenig der Gang unserer Uhren. – Alles das erscheint selbstverständlich. Aber nach unserem Prinzip ist es so wenig selbstverständlich, daß es nicht einmal allgemein wahr ist; ja, daß die Behauptung, es sei wahr schlechthin, gar keinen Sinn hat. Was wir meinen, ist, daß alles Gesagte zutreffend ist für uns irdische Beobachter. Dann aber ist es nicht zutreffend für den Beobachter auf einem Fixstern: dann ändert für ihn fortwährend der Maßstab seine Länge, die Uhr ihren Gang.

Und es ist tatsächlich zutreffend für uns: Daß ein Maßstab – im Experiment die Form einer Steinkonsole – für uns sich nicht ändert, wenn seine Orientierung gegen die Erdbewegung geändert wird, das hat Michel-

son bewiesen. Er behält für uns seine Länge, d. h. das Licht braucht für uns stets die gleiche Zeit, um seine Länge zu durchlaufen. Dann ändert sich aber notwendig diese Zeit für den Sonnenmenschen, dann ändert sich also für ihn die Länge des Maßstabes. – Der zweiten Behauptung ist gleichwertig die folgende: eine horizontale Achse werde dauernd in gleichförmiger Rotation erhalten; zwei Scheiben mit geteilten Rändern, die sie an ihren Enden trägt, sollen als Uhren dienen; sie sind synchron, wenn zwei bestimmte gleich bezeichnete Marken an ihren Rändern gleichzeitig durch die höchste Lage gehen. Behauptet wird, daß diese beiden Scheiben dauernd synchron bleiben, wenn auch die Scheibe, die zunächst bei der Erdbewegung voranging, nach zwölf Stunden hinter die andere gerückt ist. Wäre dem nicht so, so hieße das, daß die Achse sich inzwischen in bestimmtem Sinn gedrillt hätte. Wir sehen keinen Grund hierfür; aber freilich, wenn wir behaupten, daß für uns keine Drillung stattgefunden hat, so liegt darin, daß für den Beobachter auf der Sonne die Achse gedrillt wurde; denn für ihn ging zuerst die eine, dann die andere Uhr vor. Eine Beobachtung dieser Art ist nie gemacht worden, — und ebensowenig ist direkt festgestellt worden, daß der Gang unserer Uhren von der Erdbewegung unabhängig ist. Beide Versuche wären wohl auch aussichtslos; aber wir können indirekt schließen, daß sie so, wie behauptet, ausfallen würden; haben wir doch gesehen, daß alle diese Behauptungen auf das engste miteinander verknüpft sind.

Im Vorstehenden ist der Michelsonsche Versuch das Faktum. Dieser Versuch sagt aus: die Lichtausbreitung ist gleichförmig relativ zur Erde. Alles Weitere ergibt sich erst, sobald wir folgenden Satz zugeben müssen: „Diese selbe Lichtausbreitung im Vakuum, die gleichförmig relativ zur Erde ist, ist zugleich gleichförmig relativ zur Sonne (oder zu einem beliebigen andern Fixstern).“ Müssen wir ihn zugeben? — Erstens: Man könnte behaupten, die Lichtausbreitung ist nicht gleichförmig relativ zu den Fixsternen; durch den ganzen Weltraum ist sie gleichförmig relativ zur Erde. Dann würden wir jeden Stern an dem Ort sehen, an dem er sich zur Zeit der Lichtaussendung tatsächlich befand. Die sogenannte Aberration würde also bedeuten, daß die Fixsterne eine Kreisbewegung wirklich ausführen, — alle mit der gleichen Periode des irdischen Jahrs, aber nicht etwa im gleichen Rhythmus, sondern so geregelt, daß entsprechend den verschiedenen Zeiten, die das Licht von den verschiedenen Sternen bis zur Erde braucht, der Rhythmus uns gerade gleich erscheint. Eine solche Annahme machen, heißt: auf die Erklärung der Aberration verzichten. — Zweitens: Man kann einwenden: was Michelson beobachtet hat, ist die Lichtausbreitung in Luft, also in einem Körper, der die Bewegung der Erde teilt; im vollkommenen Vakuum würde sein Versuch ein anderes, positives, Resultat ergeben.[1]) Einer solchen Annahme steht entgegen, daß sich für alle direkten Beobachtungen die optisch-elektrischen Eigenschaften der Luft von denen des Vakuums kaum merklich unterscheiden. — Drittens: Man kann annehmen, auch der von wägbarer Materie freie Raum enthält noch ein Medium — man hat es Äther genannt —, in dem sich das Licht gleichförmig ausbreitet,

1) Ansatz des Verfassers.

das in der Nähe jedes Weltkörpers sehr nahezu dessen Bewegung mitmacht, und das sich in den Zwischenräumen so bewegt, daß sich die beobachtete Aberration ergibt.[2]) Einem solchen Medium müßte man, wie eine eingehendere Betrachtung zeigt, sehr unwahrscheinliche physikalische Eigenschaften zuschreiben. – Viertens: Man könnte denken, die Lichtausbreitung ist gleichförmig gegen den Fixstern, wenn das Licht vom Fixstern kommt (Aberration), aber gleichförmig gegen die Erde, wenn alle beteiligten Körper, Lichtquelle, Spiegel, Linsen, gegen die Erde ruhen (Michelson).[3]) Das hieße für den an der Bewegung nicht beteiligten Beobachter: die Lichtgeschwindigkeit ist größer, wenn die Lichtquelle sich nähert, kleiner, wenn sie sich entfernt; – oder nach dem Dopplerschen Prinzip: größer, wenn die Schwingungszahl vergrößert ist, kleiner, wenn sie verkleinert ist. Dem widerspricht, daß die Doppelsterne in gleichen Zeitintervallen ihre Spektrallinien von rot zu violett und von violett zu rot verschieben.[4])

Die in der Physik herrschende Anschauung gesteht keinem der hier vorgebrachten Einwände Berechtigung zu; sie erkennt vielmehr den vorausgeschickten Satz in seinem vollen Umfang an. Dann folgt aber alles das, was wir an unserm Modell erläutert haben, – zunächst für die beiden Systeme Fixsterne-Erde, dann aber, wenn wir der Erde nicht eine ausgezeichnete Rolle zuweisen wollen, für je zwei beliebige Systeme der Fixsterngruppe. Es folgt also: in jedem gegen die Fixsterne gleichförmig bewegten System bleiben Maßstäbe und Uhren unbeeinflußt von der Bewegung, – für einen Beobachter, der dem gleichen System angehört. Damit sind dann sofort die Veränderungen gegeben, welche der Bewohner eines anderen Systems der Fixsterngruppe, speziell der Erde, wahrnimmt. Beobachtet ist von solchen Veränderungen nichts. Das ist nicht zu verwundern: Gesetzt, wir könnten einem Körper die Geschwindigkeit gegen uns erteilen, welche die Erde gegen die Sonne hat; dann würde eine in der Bewegungsrichtung liegende Strecke sich für uns um $\frac{1}{200 \text{ Millionen}}$ ihrer Länge verkürzen, und um ebensoviel würde sich für uns der Gang der auf ihm befindlichen Uhren prozentisch ändern. Und gesetzt ferner, dieser Körper besitze die Größe der Erde, dann würde für uns die größte Differenz zweier zuvor synchroner Uhren 4 millionstel Sekunden betragen. Aber im Prinzip sind alle diese Veränderungen der experimentellen Prüfung zugänglich, und zwar genau nach den gleichen Methoden, nach welchen wir in unserem Modell den Erdenmenschen die Welt des Sonnenmenschen ausmessen ließen.

Wir wollen jetzt das Lorentz-Einsteinsche Prinzip als richtig annehmen. In ihm ist dieser Satz enthalten: Im leeren Raum sei eine Lichtwelle gegeben. Gleichgültig, wo ihre Quelle ist, gleichgültig von welchem System der Fixsterngruppe aus sie beobachtet wird, – ihre Ausbreitung stellt sich stets als quantitativ der gleiche Vorgang dar. Es existiert für sie kein Bezugssystem, gegen das sie sich eindeutig orientieren ließe. Für ein Medium „Äther“, in dem sie stattfände, ist in der Relativitätstheorie kein Platz. Für

2) Ansatz von Stokes. 3) Ansatz von Ritz.
4) Vgl. de Sitter, Physikalische Zeitschrift, Band 14, 1913.

diese Theorie ist – im Gegensatz zur bisherigen Physik – der leere Raum wirklich das Nichts.

Das ist ein fundamentaler Satz der reinen Elektrodynamik. Es tritt aber in den vorstehenden Entwicklungen deutlich zutage, daß das Lorentz-Einsteinsche Prinzip, obwohl hervorgegangen aus den Bedürfnissen der Elektrodynamik, doch nicht auf diese beschränkt werden kann; es enthält in sich bereits Aussagen mechanischer Natur. Sind diese nun verträglich mit den uns bekannten Grundsätzen der Mechanik? Wir haben im Anfang das Relativitätsprinzip der Mechanik besprochen; wir wollen es jetzt noch einmal anführen:

„Unter allen Systemen, die gegeneinander eine gleichförmige Geschwindigkeit besitzen, ist keines vor den anderen ausgezeichnet; in bezug auf jedes System einer solchen Gruppe spielen sich alle Vorgänge in genau der gleichen Weise ab. Unter allen Gruppen aber ist die Fixsterngruppe ausgezeichnet; nur wenn wir ein System dieser Gruppe als ruhend betrachten, erhalten wir eine einfache Darstellung der Tatsachen; welches System der Gruppe wir aber wählen, ist vollständig gleichgültig." — Oder nochmals in anschaulicher Fassung des ersten Satzes: „Die ganze Eigenwelt eines Beobachters erhalte, während er schläft, eine gleichförmige Geschwindigkeit gegen die Außenwelt. Der Beobachter wird nie erfahren, was während seines Schlafes vorgegangen ist, solange seine Beobachtungen auf seine eigene Welt beschränkt bleiben." (Satz A.)

Diese Aussagen stimmen in jedem Wort mit dem Lorentz-Einsteinschen Prinzip überein. Der Unterschied tritt erst hervor, wenn wir fragen, wie denn ein in der ruhenden Außenwelt zurückgebliebener Beobachter die Vorgänge in der in Bewegung geratenen Welt beurteilt. Diese Frage ist in der bisherigen Mechanik nie gestellt worden, weil die Antwort selbstverständlich schien:

„Er urteilt (indem er natürlich der gegenseitigen Verschiebung Rechnung trägt) ebenso wie der bewegte Beobachter, vorausgesetzt, daß er richtige Instrumente benutzt. Richtig oder unrichtig aber sind Instrumente schlechthin; also darf und wird er die Instrumente zur Messung wählen, mit denen er seine eigene, die Außenwelt vermessen hat." (Satz B.)

Das Lorentz-Einsteinsche Prinzip aber antwortet:

„Mit eben diesen Instrumenten wertet er die bewegte Welt falsch aus – oder vielmehr anders als der bewegte Beobachter. Die Längen- und Zeitangaben dieser Instrumente müssen erst in der oben besprochenen Weise umgewertet werden; erst dann ergibt sich Gleichheit der Urteile." (Satz C.)

Können wir nun trotz dieses Gegensatzes hoffen, ein einheitliches Prinzip für die gesamte Physik zu finden? Den Satz B auf die Elektrodynamik anzuwenden, geht nicht an; denn angesichts der für beide Beobachter gleichförmigen Lichtausbreitung im Vakuum schließen A und B sich gegenseitig aus. Also bleibt nur übrig, dem Satz C ganz allgemeine Gültigkeit zuzuschreiben.

Daß ihm keine mechanische Erfahrung widerspricht, haben wir schon gesehen. Wohl aber löst er alle mechanischen Grundbegriffe auf.

Raum- und Zeitgrößen können nicht mehr eindeutig und nicht mehr unabhängig voneinander definiert werden. Der Begriff des starren Körpers wird relativ; er hängt vom Beobachter ab. Aber weiter: auch die Masse eines Körpers ist nichts Konstantes, sie hängt ab von der Bewegung des Körpers gegen den Beobachter. Darauf wollen wir noch kurz eingehen.

Das Newtonsche Bewegungsgesetz für einen freien Massenpunkt lautet: „Kraft = Masse ⨯ Beschleunigung“. Es ist geprüft für kleine Geschwindigkeiten (klein gegen die Lichtgeschwindigkeit). Es möge also streng gelten für irgendeinen Beobachter, wenn der Massenpunkt aus der Ruhe gegen den Beobachter in Bewegung übergeht. Der Punkt habe nun eine gewisse Geschwindigkeit v erlangt; dann ruht er in diesem Moment gegen ein anderes Bezugssystem, nämlich gegen dasjenige, welches eben diese Geschwindigkeit v gegen den Beobachter besitzt. In diesem Bezugssystem gilt nun nach dem Relativitätsprinzip unverändert das alte Gesetz. Für den Beobachter aber gilt es nicht mehr in der alten Form: für ihn drücken sich die Längen und Zeiten und folglich auch die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen anders aus. Diese veränderten Werte können wir genau angeben. Auch die Kräfte werden für ihn einen andern Ausdruck haben. Aber den können wir im allgemeinen nicht angeben; den soll uns erst die neue Mechanik lehren. Nur in einem Fall können wir es: wenn es sich um elektrische Kräfte handelt; denn hier steht der Ausdruck für die Kräfte im engsten Zusammenhang mit den Gleichungen, aus denen die Ausbreitung des Lichts folgt. Dann kennen wir also in der Newtonschen Gleichung sowohl „Beschleunigung“ wie „Kraft“ in ihrer Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Massenpunkts gegen den Beobachter, und folglich auch „Masse“. Es ergibt sich, daß die Masse wächst mit der Geschwindigkeit. Die Zunahme ist verschwindend klein selbst noch für die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn um die Sonne. Denken wir uns aber eine ähnliche Bewegung des Punktes, die mit $^3/_4$ der Lichtgeschwindigkeit erfolgt, so ist seine Masse bereits das $1^1/_2$fache derjenigen, die er in der Ruhe besitzt.

Und nun will es das Glück, daß wir ein Etwas kennen, das diese und noch größere Geschwindigkeiten erhalten kann, und das sich bewegt unter dem Einfluß elektrischer Kräfte. Es sind dies die sogenannten Elektronen, negativ elektrisch geladene, kleinste Teilchen, die wir zuerst in den Kathodenstrahlen kennen gelernt haben, und die sich dann u. a. auch wiedergefunden haben in der Strahlung der radioaktiven Körper. In diesen beiden Erscheinungsformen sind sie auf die Veränderlichkeit ihrer Masse hin untersucht worden. Die neuesten Versuche sind die von Bucherer – sie beziehen sich auf Radiumstrahlen, und die von Hupka – sie beziehen sich auf Kathodenstrahlen. Beide haben wesentlich verschiedene Untersuchungsmethoden angewandt; beide gelangen zu dem gleichen Schluß: Die Masse ändert sich, und zwar genau so, wie es das Relativitätsprinzip verlangt.

Also: der erste Versuch, das Lorentz-Einsteinsche Prinzip auf die Mechanik auszudehnen, hat Erfolg gehabt.[1] Man wird nach neuen Gelegen-

1) Es muß jedoch erwähnt werden, daß die ersten, sehr sorgfältig ausgeführten Untersuchungen der schnellen Elektronenbewegungen durch Kaufmann zwar auch eine Vergrößerung der Masse, aber nicht genau in dem vom Relativitätsprinzip geforderten Betrage ergeben haben. Eine völlige Aufklärung des Widerspruchs zwischen den Beobachtungen steht noch aus.

heiten, die Probe auf das Exempel zu machen, mit Eifer suchen. Nehmen wir an, daß das Prinzip sich durchweg bewähre. Dann wird die Physik von Grund aus verändert sein; bisherige Fundamentalbegriffe, wie die konstante Masse und der starre Körper, werden zum Range praktisch brauchbarer Näherungen herabgesunken sein. Es wird so zutage treten, daß die Welt minder einfach gefügt ist, als wir wähnten. Aber unser Weltbild wird einheitlicher sein als zuvor: Elektrik und Mechanik werden in ihm verschmolzen sein, aber seine feinsten Züge wird es der Elektrik verdanken.

Anhang.[1])

Das Relativitätsprinzip fordert bezüglich der Lichtausbreitung im leeren Raum:

1. daß diese Ausbreitung der gleiche Vorgang sei, — nämlich eine Ausbreitung in Kugelwellen mit der bestimmten Geschwindigkeit $c = 300000$ km/sec, — für alle Systeme der Fixsterngruppe.

2. daß unter allen Systemen der Fixsterngruppe keines ausgezeichnet sei, daß man also mit völlig gleichem Recht einerseits das System S' betrachten dürfe als mit der Geschwindigkeit v gegen das System S in bestimmter Richtung bewegt, — andrerseits das System S als mit der Geschwindigkeit v gegen das System S' in der entgegengesetzten Richtung bewegt.

Die mathematische Formulierung lautet: wenn $txyz$ Zeit und Koordinaten im System S, $t'x'y'z'$ Zeit und Koordinaten im System S' bedeuten, und S' gegen S die Geschwindigkeit v in der Richtung der wachsenden x und x' besitzt, wobei die y-Achse zur y'-Achse, die z-Achse zur z'-Achse parallel sein soll, dann muß

1. Die Gleichung $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$ identisch sein mit der Gleichung $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2$, und es müssen

2. die Gleichungen, welche $t'x'y'z'$ durch $txyz$ ausdrücken, sich verwandeln in die Gleichungen, welche $txyz$ durch $t'x'y'z'$ ausdrücken, sobald v mit $-v$ vertauscht wird.

Die Lösung dieser Aufgabe, die leicht zu verifizieren ist, lautet:

$$\text{(a)}\quad t' = k\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \qquad \text{(b)}\quad t = k\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right)$$

$$\text{(c)}\quad x' = k\,(x - vt) \qquad \text{(d)}\quad x = k\,(x' + vt')$$

$$y' = y \qquad z' = z$$

wo

$$k^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}.$$

In diesen Gleichungen ist zunächst alles enthalten, was wir am Modell erläutert haben. Im Modell ist $c = \frac{60\text{ cm}}{7\frac{2}{3}\text{h}}$ und $\frac{v}{c} = \frac{3}{4}$, folglich $k = \frac{3}{2}$ (rund). Es mögen sich $txyz$ auf das himmlische, $t'x'y'z'$ auf das irdische System beziehen.

Wir zeigten: diese Geschwindigkeit c gilt für die Lichtfortpflanzung nach $+x$ und nach $-x$ im himmlischen, nach $+x'$ und nach $-x'$ im irdischen System. Wir bemerkten ferner, daß die irdischen Uhren E_1 und E_2 für den

1) Zum folgenden siehe vor allem A. Einstein, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, Band 4, 1907.

Sonnenmenschen nicht synchron gehen, für ihn vielmehr E_2 gegen E_1 um $5^3/_4$ Stunden zurück ist. Das heißt: während $t_1 = t_2$ ist, ist $t_1' - t_2' = 5\frac{3}{4}^h$. Nun zeigt aber die Gleichung (b): wenn $t_1 = t_2$, so ist

$$t_1' + \frac{v}{c^2} x_1' = t_2' + \frac{v}{c^2} x_2'$$

oder

$$t_1' - t_2' = \frac{v}{c^2} (x_2' - x_1') = \frac{3}{4} \cdot \frac{7\frac{2}{3}}{60} \cdot 60^h = 5\frac{3}{4}^h,$$

denn

$$x_2' - x_1' = 60 \text{ cm}.$$

Wir zeigten weiter, daß der Sonnenmensch, der zu gleichen Zeiten t seine Marken von den Punkten „0" und „60 cm" des Sonnenmaßstabs überträgt, auf dem irdischen Maßstab 90 cm abgrenzt. Nun folgt aus der Gleichung (c): für $t_1 = t_2$ ist

$$x_2' - x_1' = k(x_2 - x_1) = \frac{3}{2} \cdot 60 \text{ cm} = 90 \text{ cm}.$$

Umgekehrt: der Erdenmensch, der zu gleichen Zeiten t' seine Marken von den Punkten „0" und „60 cm" des irdischen Maßstabes überträgt, grenzt auf dem himmlischen Maßstab 90 cm ab. Aus der Gleichung (d) folgt aber für $t_1' = t_2'$:

$$x_2 - x_1 = k(x_2' - x_1') = \frac{3}{2} \cdot 60 \text{ cm} = 90 \text{ cm}.$$

Wir zeigten: einem Vorgang, der an einem bestimmten Punkt der Erde, also bei einem bestimmten x'-Wert sich abspielt und dort 7 Stunden dauert, schreibt der Sonnenmensch eine Dauer von $10^1/_2$ Stunden zu. Nun folgt aus der Gleichung (b): für $x_1' = x_2'$ ist

$$t_2 - t_1 = k(t_2' - t_1') = \frac{3}{2} \cdot 7^h = 10\frac{1}{2}^h.$$

Wir zeigten endlich: genau so urteilt der Erdenmensch über einen Vorgang in einem bestimmten Punkt der Sonne, der sich also bei einem bestimmten x-Wert abspielt, und der dort 7 Stunden dauert. Aus der Gleichung (a) folgt: für $x_1 = x_2$ ist

$$t_2' - t_1' = k(t_2 - t_1) = \frac{3}{2} \cdot 7^h = 10\frac{1}{2}^h.$$

Soweit das Modell und die Lichtausbreitung im Vakuum. Das Relativitätsprinzip fordert nun allgemein: Ein physikalisch bestimmter Vorgang zwischen Körpern, die in S ruhen, drückt sich durch $txyz$ ebenso aus, wie sich ein physikalisch identischer Vorgang zwischen Körpern, die in S' ruhen, durch $t'x'y'z'$ ausdrückt. Was im Text als „Umwertung" bezeichnet ist, bedeutet: den Wert einer Größe, die in ihrer Abhängigkeit von $txyz$ gegeben ist (d. h. so wie sie B in S beobachtet), in ihrer Abhängigkeit von $t'x'y'z'$ ausdrücken (d. h. so wie sie B' in S' beobachtet). Dabei ist für $v = 10$ Meter/Sekunde (strömendes Wasser):

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{3 \cdot 10^7}; \qquad k = 1 + \frac{1}{18 \cdot 10^{14}};$$

für $v = 30$ Kilometer/Sekunde (Erde gegen Sonne):

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{10^4}; \qquad k = 1 + \frac{1}{2 \cdot 10^8}.$$

Die Anwendungen im Text betreffen Geschwindigkeiten. Eine solche heiße:

u mit Komponenten $u_x = \frac{x}{t}$, $u_y = \frac{y}{t}$, $u_z = \frac{z}{t}$ in S,

u' mit Komponenten $u'_x = \frac{x'}{t'}$, $u'_y = \frac{y'}{t'}$, $u'_z = \frac{z'}{t'}$ in S',

Es ist nach den Gleichungen Seite 22 unter 2:

$$\frac{x'}{t'} = \frac{x - vt}{t - \frac{v}{c^2}x}, \quad \frac{y'}{t'} = \frac{y}{k\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)}, \quad \frac{z'}{t'} = \frac{z}{k\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)};$$

oder

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{v}{c^2}u_x}, \quad u'_y = \frac{u_y}{k\left(1 - \frac{v}{c^2}u_x\right)}, \quad u'_z = \frac{u_z}{k\left(1 - \frac{v}{c^2}u_x\right)}.$$

1. (Fig. 10.) Gegen einen strahlenden Fixstern (S) bewege sich die Erde (S') mit der Geschwindigkeit v in der Richtung x senkrecht zur Verbindungslinie y.[1]) Wir fragen nach der Geschwindigkeit und Richtung der Strahlung, die der Erdbewohner beobachtet. Für den Fixsternbewohner ist $u_x = 0$, $u_y = c$, $u_z = 0$. Daraus $u'_x = -v$, $u'_y = \frac{c}{k}$, $u'_z = 0$.

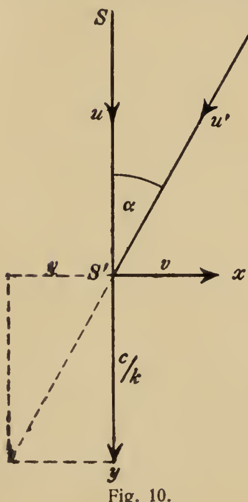


Fig. 10.

Also $u'^2 = v^2 + \frac{c^2}{k^2} = c^2$, oder $u' = c = u$. Aber (s. Fig. 10) $tg\,\alpha = -\frac{u'_x}{u'_y} = k\frac{v}{c}$.

α, der Aberrationswinkel, ergibt sich in der elementaren Darstellung aus $tg\,\alpha = \frac{v}{c}$. Die Beobachtung kann zwischen den beiden Werten nicht entscheiden.

2. Durch eine in der Richtung x mit der Geschwindigkeit w strömende Flüssigkeit (S) werde Licht in gleicher Richtung gesandt. Seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist in S: $u_x = q = \frac{c}{n}$, wo n der Brechungsexponent; $u_y = u_z = 0$. Folglich für den ruhenden Beobachter in S': ($v = -w$)

$$q' = u'_x = \frac{q + w}{1 + \frac{wq}{c^2}},$$

oder da $\frac{w}{c}$ sehr klein ist, auch

$$q' = q + w - w\frac{q^2}{c^2} = q + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)w.$$

Dies ist aber das Ergebnis der Fizeauschen Versuche.

---

1) Auf diesen Fall wollen wir uns beschränken, und wir wollen zugleich, zur Vereinfachung der Darstellung, von der Bewegung des ganzen Sonnensystems gegen den Fixstern absehen; v bedeutet dann die Geschwindigkeit der Erde in der Bahn um die Sonne.


G.E.STECHERT
& Co.
NEW YORK

VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN

Lehrbuch der Physik. Von Dir. **E. Grimsehl.** Zum Gebrauch beim Unterricht, bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium. 2. Auflage. Mit 1296 Figuren, 2 farbigen Tafeln und Tabellen physikalischer Konstanten und Zahlentabellen. 1912. Geh. ℳ 15.—, in Leinw. geb. ℳ 16.—

Auch der gebildete Laie, der das Bedürfnis hat, auf Grund einer guten naturwissenschaftlichen Allgemeinausbildung seine physikalischen Kenntnisse zu vertiefen, wird das Buch mit Nutzen verwenden können. Was es für diese Zwecke besonders geeignet macht, ist die hervorragend klare und anregende Art der Darstellung. Jeder Abschnitt geht von einfachen Beobachtungen und leicht anzustellenden Versuchen aus. Über tausend Abbildungen, zumeist sind es recht charakteristische schematische Zeichnungen, unterstützen den Text in wirksamer Weise.... Mit einem Worte, das Buch verdient in wissenschaftlicher, methodischer und didaktischer Hinsicht volle Anerkennung. **(Natur und Erziehung.)**

Die Mechanik. Eine Einführung mit einem metaphysischen Nachwort von Professor **Ludwig Tesar.** Mit 111 Figuren. 1909. Geh. ℳ 3.20, in Leinw. geb. ℳ 4.—

Die Einführung will die Dunkelheiten mechanischer Einleitungen dadurch vermeiden, daß sie erklärt und nicht beschreibt, daß sie die Annahmen des mechanischen Weltbildes allmählich herausarbeitet, daß sie also bewußt dem Wahnbilde einer „hypothesenfreien Wissenschaft" entgegentritt. — Die Kraft ist von ihrer Äußerung geschieden; die Bewegungslehre ist der eigentlichen Mechanik gegenübergestellt; der Begriff des materiellen Punktes wird benutzt. Die mechanischen Sätze werden an wirklichen Vorgängen erläutert. Mathematische Formeln sind vermieden, rechnerische Herleitungen sehr elementar gehalten.

Drehkreisel. V. **John Perry.** Übersetzt v. Aug. Walzel. 2. Aufl. Mit 66 Abbild. und einem Titelbild. 1913. In Leinw. geb. ℳ 2.80.

„...Möge jeder, der sich für Kreiselbewegung interessiert, ganz besonders aber auch der Fachmann, das Büchlein lesen. Auf fast spielende Art sind die schwierigen Probleme behandelt, und dabei wird der Leser bei ernstlichem Studium doch zu einem tiefgehenden Verständnis der Kreiselbewegungen geführt." **(Bayr. Zeitschrift für Realschulwesen.)**

Das Prinzip der Erhaltung der Energie. Von **Max Planck**-Berlin. 3. Auflage. 1913. In Leinw. geb. ℳ 6.—

Behandelt die historische Entwicklung des Prinzips von seinen Uranfängen bis zu seiner allgemeinen Durchführung in den Arbeiten von Mayer, Joule, Helmholtz, Clausius, Thomson; die allgemeine Definition des Energiebegriffs, die Formulierung des Erhaltungsprinzips nebst einer Übersicht und Kritik über die versuchten Beweise.

Populäre Astrophysik. Von **J. Scheiner.** 2. Auflage. Mit 30 Tafeln u. 210 Fig. gr. 8. 1912. In Leinw. geb. ℳ 14.—

„...Das Erscheinen dieses Werkes füllt eine bisher immer unangenehm empfundene Lücke aus, und zwar in einer so vorzüglichen Weise, daß man nur wünschen kann, daß keine Bibliothek und überhaupt niemand, der sich für Physik und Astronomie interessiert, das Buch in seiner Sammlung vermissen möge. Die neuesten Forschungsergebnisse sind berücksichtigt, die Darstellung ist überall einfach, klar und kritisch gewissenhaft. Bilder und Tafeln sind geschickt und glücklich gewählt und vortrefflich wiedergegeben. Dabei ist die gesamte Anlage durchaus übersichtlich und der physikalische Teil ohne Anforderung an mathematische Kenntnisse geschrieben." **(Monatshefte für Mathematik und Physik.)**

Gaskugeln. Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische und meteorologische Probleme. Von Dr. **R. Emden,** Professor in München. Mit 24 Figuren, 12 Diagrammen und 5 Taf. 1907. In Leinw. geb. ℳ 13.—

Untersuchungen über den Bau und die fortschreitende Entwicklung gasförmiger Himmelskörper liegen nur in einigen z. T. schwer zugänglichen Abhandlungen vor. Verfasser hat diese Untersuchungen neu aufgenommen, von möglichst allgemeinen Gesichtspunkten aus durchgeführt und die erhaltenen Resultate in Form eines kurzen Lehrbuches niedergelegt.

„...‚Gaskugeln' nennt der Münchner Gelehrte anspruchslos sein neuestes Buch, und doch, welch eine Fülle bedeutender wissenschaftlicher Arbeit ist in ihm enthalten, welch reichhaltiges Material findet namentlich der Kosmologe hier aufgespeichert! Wer künftig die Namen von Kant und Laplace in den Mund nimmt, wird es sich gefallen lassen müssen, wenn es sich um kosmische Probleme handelt, kühl auf Emden hingewiesen zu werden." **(Berliner Tageblatt.)**

Das Relativitätsprinzip. Eine Einführung in die Theorie von **A. Brill,** Professor an der Universität Tübingen. Mit 6 Fig. gr. 8. 1912. Geh. ℳ 1.20

Die kleine Schrift, der Inhalt eines Ferienkursus, wünscht den Leser an der Hand von elementaren Überlegungen und Rechnungen in die Grundanschauungen der Relativitäts-Theorie einzuführen. Ausgehend von der Forderung, daß bei verschieden rasch bewegten Medien Kugelwellen Kugelwellen bleiben, gleichviel welcher Art die Erregungsquelle ist, wird (1. und 2. Teil) das System der Lorentz-Einsteinschen Transformationsformeln — auch in der von Minkowski verlangten allgemeinen Gestalt — aufgestellt und erörtert. Im 3. Teil findet man die dem Relativitätsprinzip entsprechende Fassung der Bewegungsgleichungen des materiellen Punktes und einige für den Begriff Maße sich ergebende Folgerungen besprochen.

Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation. Von **A. Einstein** und **M. Großmann.** I. Physikal. Teil von A. Einstein-Zürich. II. Mathematischer Teil von M. Großmann-Zürich. gr. 8. 1913. Geh. ℳ 1.20

Die Verfasser suchen auf die Hypothese von Wesensgleichheit der trägen und der gravitierenden Masse eine Relativitätstheorie zu gründen, welche die jetzige Relativitätstheorie als Spezialfall enthält und die Gravitation umfaßt. Die Arbeit enthält eine systematische Darstellung des absoluten Differentialkalküls, das in der vorgetragenen Theorie die gleiche Rolle spielt wie die gewöhnliche vierdimensionale Vektoranalysis in der jetzigen Relativitätstheorie.

Das Relativitätsprinzip. Eine Sammlung von Abhandlungen. Von **H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski.** gr. 8. 1913. Steif geh. ca. ℳ 3.—

Das Bändchen soll die historische Entwicklung des Relativitätsprinzips zur Darstellung bringen, indem es eine Reihe charakteristischer Originalabhandlungen über diesen Gegenstand vereinigt. Es sind dies vor allem: die Arbeit von H. A. Lorentz aus dem Jahre 1904 „Electromagnetic phenomena in a System moving with any velocity smaller than that of light (in deutscher Übersetzung), die Arbeit von Einstein aus dem Jahre 1905 „Zur Elektrodynamik bewegter Körper", Minkowskis Vortrag „Raum und Zeit", den er 1908 auf der Naturforscherversammlung in Cöln gehalten hat. Anmerkungen und Zusätze werden die Arbeiten erläutern und untereinander verknüpfen.